



Pilotage des productions d'objets complexes dans l'industrie de l'Espace : innovation intensive et sériation

Gilbert Giacomoni, Jean-Claude Sardas

► To cite this version:

Gilbert Giacomoni, Jean-Claude Sardas. Pilotage des productions d'objets complexes dans l'industrie de l'Espace : innovation intensive et sériation. *Revue française de gestion industrielle*, 2011, 30 (1), pp.18. hal-00690124

HAL Id: hal-00690124

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00690124>

Submitted on 21 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pilotage des productions d'objets complexes dans l'industrie de l'Espace : innovation intensive et sériation

Gilbert GIACOMONI – Jean-Claude SARDAS

MINES PARITECH

Centre de Gestion Scientifique - 60, Bd Saint Michel, 75006 PARIS

Contact : GIACOMONI Gilbert

gilbert.giacomoni@mines-paristech.fr

Revue Française de Gestion Industrielle, Vol. 30, N° 1 — 2011

Résumé

Les entreprises nées du développement de technologies avancées dans l'aéronautique, les technologies biomédicales ou l'informatique, doivent gérer une innovation intensive et une sériation optimale. A la maîtrise des procédés stratégiques, des coûts et des délais ainsi qu'à un arsenal de normes et de procédures s'ajoutent un rythme élevé de l'innovation produit et des défis technologiques permanents, marqués d'incertitudes et soumis dès leur gestation à une compression sévère des cycles et des coûts. Les difficultés de pilotage, de coordination et le manque de robustesse des plannings exigent de s'interroger sur les choix stratégiques en matière d'organisation, d'instrumentation et de savoirs sous-tendus. Quelles approches et quels modèles semblent pertinents pour organiser et gérer la conception et la production de tels systèmes techniques complexes ? En collaboration avec un groupe d'industriels, notamment EADS, des recherches avaient été menées voici quelques années, sous la forme d'un aller-retour entre analyse empirique et modélisation. La recherche y avait vu une opportunité de progresser dans la construction et la confrontation de bases théoriques nouvelles car les approches classiques s'étaient avérées infructueuses. Nous relatons le cas d'une de ces entreprises spécialisée dans l'activité spatiale (Cf 1.1). Nous exposons les problématiques organisationnelles et instrumentales rencontrées (Cf 1.2 et 1.3). Nous présentons les modèles et les concepts nouveaux qui avaient permis de clarifier la lecture de ces problématiques et leur émergence, pour finir en présentant les solutions imaginées et expérimentées (Cf.2.1 et 2.2). Des régimes élevés d'innovation et de reproduction en série dessinent des formes organisationnelles en réseaux spécialisés avec un pilotage centralisé. Ces régimes exigent aussi une nouvelle modélisation de la définition des objets. Les avancées théoriques et les développements industriels accomplis pourraient, par leurs généralités, profiter tant à la recherche en gestion qu'aux très nombreuses entreprises confrontées à la complexité de leurs systèmes, au pilotage d'une innovation permanente et à une nécessité de sériation.

Mots clé : planification, ordonnancement, organisation, évolutions, interchangeabilité, ...

Piloting the Productions of Complex Objects in Space Industry : Intensive Innovation and Serial Reproduction

Gilbert GIACOMONI – Jean-Claude SARDAS

Revue Française de Gestion Industrielle, Vol. 30, N° 1 — 2011

Abstract

Companies arisen from the development of advanced technologies, in the aeronautics, the biomedical technologies or the computing, have to manage an extensive innovation and an optimal serial reproduction. The control of strategic processes, costs and deadlines, as well as an arsenal of standards and procedures, must face a high rhythm of innovation and technological challenges, with uncertainties and a severe compression of cycles and costs. The difficulties of piloting, coordination and the lack of robustness of the schedules, require to wonder about the strategic choices in organization, in instrumentation and in knowledges. Which approaches and which models seem relevant to organize and manage the conception and the production of such complex technical systems ? In association with a group of industrialists, in particular EADS, researches had been led a few years ago, under a round trip between empirical analysis and modeling. The research found an opportunity there to progress in the construction and the confrontation of new theoretical bases because the classic approaches had turned out fruitless. We tell the case of one of these companies specialized in the spatial activity (Cf 1.1). We expose the organizational and instrumental met problems (Cf 1.2 and 1.3). We present the models and the new concepts which clarified the reading of these problems and their emergence too, to finish by presenting the imagined and experimented solutions (cf 2.1 and 2.2). High regimes of innovation and of serial reproduction draw organizational forms with specialized networks and a centralized piloting. These regimes also demand a new design of the definition of objects. The theoretical headways and the accomplished industrial developments could benefit both the research in management and the very numerous companies confronted with the complexity of their systems, the piloting of a permanent innovation and at the same time a necessity of serial reproduction.

Keywords : management, planning, organization, evolutions, interchangeability, ...

Introduction

Les entreprises issues du développement des technologies de pointe (informatique, aéronautique, technologies biomédicales,...) doivent gérer des phases d'intense foisonnement technologique et technique sur lesquelles se greffent des phases de reproduction en plus ou moins grandes séries, assumées ou sous-traitées en tout ou partie, selon le découpage qu'autorisent la maîtrise et les coûts des procédés stratégiques. C'est une double difficulté gestionnaire que ces entreprises doivent affronter : innovation intensive et sériation¹ optimale.

Dans de tels contextes, les projets sont des défis technologiques marqués d'incertitudes et soumis dès leur gestation à une compression sévère et permanente des cycles et des coûts. Les difficultés de pilotage, de coordination et le manque de robustesse des plannings exigent de s'interroger sur les choix stratégiques en matière d'organisation, d'instrumentation et de savoirs sous-tendus (Maurice et alii, 1982 ; Tyagi R.K., Sawhney M. S., 2010 ; Gupta Y. P., Somers T. M., 1996). Quelles approches et quels modèles semblent pertinents pour organiser et gérer la production de tels systèmes techniques *complexes* ?

Il y a quelques années des recherches avaient été menées sous la forme d'un aller-retour entre analyse empirique et modélisation, en collaboration avec l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et un groupe d'industriels (Dassaults aviation, EADS, Groupe Safran, Groupe Nexter (GIAT)...) confrontés à ce type de problématiques. La recherche (Giacomoni, 2002) y avait vu une opportunité de progresser dans la construction et la confrontation de bases théoriques nouvelles car les approches classiques s'étaient avérées infructueuses. Les entreprises entrant dans le champ des systèmes dits complexes étaient toutes marquées par des compétences fortes sur des technologies avancées (nano-mécanique², cryogénie...) et sur le comportement des systèmes dans des ambiances et des conditions extrêmes. La réalisation de systèmes hétérogènes et à forts contenus technologiques, se cadénçait en petites et moyennes séries et pouvait s'étaler sur plusieurs mois, voire plusieurs années. Les réalisateurs et les processus techniques étaient en permanence soumis à des situations d'incertitude à un rythme élevé de l'innovation produit ainsi qu'à un arsenal de normes et de procédures. Les industries dédiées aux systèmes complexes exigeaient des moyens matériels, humains et organisationnels spécifiques qui les écartaient par là même des modèles classiques de gestion dont la philosophie n'avait pas toujours été pensée en relation avec les spécificités de ce type d'industries de l'extrême (Burns et Stalker, 1961).

Nous allons présenter le cas d'une de ces entreprises spécialisée dans l'activité spatiale (Cf 1.1). Les systèmes complexes qui étaient conçus et réalisés, comme les véhicules de transports spatiaux *Ariane*, devaient être spécifiques à chaque mission, suivre l'accélération des cadences de lancement, coûter l'équivalent d'un gros avion de ligne et parcourir l'atlantique en moins de quatre minutes. Nous exposerons les problématiques organisationnelles et instrumentales rencontrées pour assurer une double performance technique et économique (Cf 1.2 et 1.3). Nous présenterons les modèles et les concepts nouveaux qui ont permis de clarifier la lecture de ces problématiques et leur émergence, en décalage par rapport aux typologies habituellement prises en référence (Hatchuel et Sardas, 1991) et finirons en présentant les solutions imaginées et expérimentées (Cf.2.1 et 2.2).

Les avancées théoriques et les développements industriels accomplis présentent, par leurs généralités, un intérêt autant pour la recherche en gestion que pour les très nombreuses entreprises confrontées à la complexité de leurs systèmes, au pilotage d'une innovation permanente et d'une nécessité de sériation.

¹ Passage à une reproduction en série

² précision de l'ordre du micron

1. Les problématiques industrielles rencontrées pour la conception et la réalisation des véhicules de transport spatiaux

Si la stabilité était la principale caractéristique des organisations de type taylorien et bureaucratique (Mintzberg, 1982) c'est l'innovation et la sériation avec leurs contingences d'instabilités technologiques et économiques qui modèlent les organisations et les appareils gestionnaires du secteur aéronautique. La forme d'organisation rencontrée (structure, processus de travail...) pouvait se comprendre comme le résultat d'une adaptation aux spécificités de l'activité et aux données environnementales, en vue de meilleures performances. Les facteurs explicatifs étant principalement l'hétérogénéité technologique des systèmes, leur degré d'assemblage, la cadence et la taille des séries, l'intense évolutivité technique, la compression des cycles et des coûts. « *Les couples hommes/matière constituent les unités de production dont l'organisation de l'espace s'emploie à déterminer la nature, les dimensions et les connexions optimales : un cadre pour les mouvements et les flux..* » (Cohen, 1994). L'organisation avait évolué vers des réseaux de partenariat poussé avec des structures allégées et aplaties, déhiérarchisant et décentralisant les ressources spécialisées en unités. Diverses combinaisons de solutions - modes variables de coordination internes (nœuds de contrats, partenariats,...), jeu de rôles sophistiqué visaient à structurer sagement ce système industriel complexe. Il en allait de même pour l'instrumentation gestionnaire. Les systèmes d'information et les outils de planification pour piloter la production se heurtaient à d'importants manques théoriques et sous-tendaient des logiques de gestion en décalage par rapport aux contraintes de l'activité et à l'organisation en place.

1.1. Découpage technologique des systèmes et difficultés de pilotage industriel d'une structure gigogne et multi-centriste.

Pour les véhicules de transport spatiaux en phase développement, le client d'EADS était le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) agissant pour le compte de l'Agence Spatiale Européenne³ (ESA). En phase de (re)production, dite de série, le client devenait Arianespace⁴. La réussite à la fois stratégique (accès à l'espace, prouesses technologiques,...) et commerciale (fiabilité sans sur-qualité, abaissement des coûts, accélération des cadences de production et de lancements) de l'activité, tenait à une bonne conjugaison de ces deux phases qui pouvaient différer par les objectifs, les moyens et l'organisation.

La dissection des systèmes sur le principe du *juste retour* de l'ESA - par lequel les contrats attribués aux industriels de chaque pays, étaient proportionnels à la participation de leur gouvernement dans le financement du programme - engendrait un découpage sur la base de relations clients/fournisseurs (maître d'œuvre à contractants, puis contractants à sous-contractants, etc). En découlait une organisation gigogne qui trouvait son écho dans les usines des industriels. L'expression des besoins se faisait en cascade à partir d'un programme de lancements des *Arianes* et se déclinait en plan de livraison des étages, lequel déclenchait les commandes de sous-ensembles et ainsi de suite. A l'usine des Mureaux d'EADS, l'intégration des étages se faisait sur un site spécifique avec ses plates-formes d'érection à partir des éléments provenant des divers partenaires industriels communautaires et de la production faite in situ (réservoirs, les structures inter-étages, faisceaux de câbles...). La production se présentait comme un réseau interdépendant d'unités technologiques⁵ quasi-autonomes (décisions,

³ En général, l'ESA passe ses marchés de développement directement, sauf dans le cas d'Ariane via le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales³), auquel elle délègue la gestion technique et financière des programmes. Par l'intermédiaire d'Arianespace, l'ESA achète également des lancements d'Ariane pour ses satellites scientifiques, météorologiques ou d'observation.

⁴ Première société commerciale de transport spatial dans le monde. Elle assure la commercialisation et la conduite des opérations de lancement mais aussi le financement et la maîtrise d'œuvre de la production des lanceurs Ariane.

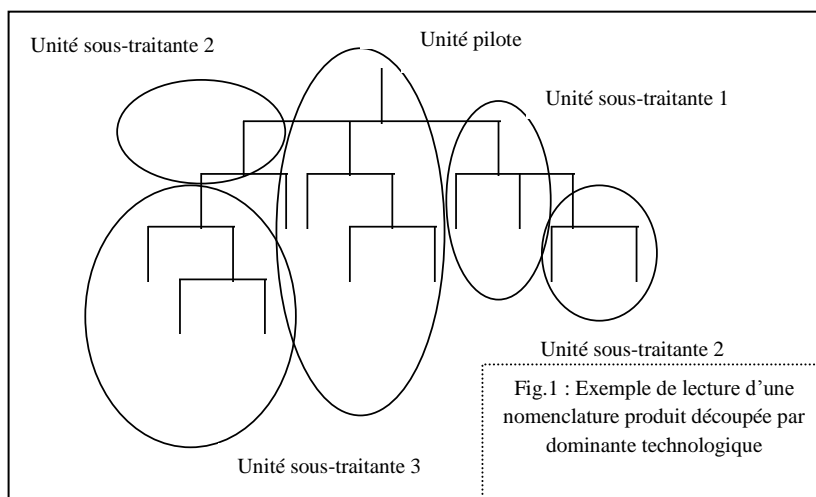
⁵ unités : *ensembles soudés* (réservoirs et tuyauteries,...) ; *ensembles composites* (adaptateur charge utile, membrane 3ème,...) ; *ensembles conventionnels* (rivetage, boulonnage et collage de protections thermiques, carénages moteur du 1er étage, pré-assemblage des jupes inter-étages et inter-réservoirs, case à équipements,...) ; *câblages électriques* (produits électriques vol destinés aux étages d'Ariane,...) ; *mécanique conventionnelle et micromécanique* (mécanique de précision et d'intégration de micro-mécanismes, brides réservoir 2ème étage, panneaux de réservoir cryogénique 3ème étage,...) notamment.

gestion, exécution) fonctionnant de manière multi-centriste sur la base de relations de sous-traitance interne. Cette configuration organisationnelle (Mintzberg, 1982) était relativement caractéristique des acteurs⁶ (Crozier et Friedberg, 1977) œuvrant sur des produits high-tech, en petites et moyennes séries, requérant un haut degré d'assemblage.

Les technologies avancées ont tendance à spécialiser et à concentrer les ressources humaines et matérielles, pour créer une émulation de nouvelles connaissances, favoriser la maîtrise et le développement de savoir-faire spécifiques et accroître aussi la réactivité à l'égard du client (modifications de planning, réallocation de ressources, évolutions techniques...). En production, les installations sophistiquées et dédiées (autoclaves de grande dimension, étuves, presses, salles blanches pour matériaux composites...), généralement très coûteuses, étaient co-localisées par technologie en raison aussi de la très petite taille des séries. A contrario, les autres ressources étaient mutualisées. Impossible⁷ par conséquent d'envisager une mise en place rentable des lignes de produits, tant que les cadences n'étaient pas suffisantes pour justifier la duplication des postes de charges. Chaque unité avait son propre service Méthodes préparation et Ordonnancement, avec un effectif de soixante à cent personnes, pour l'essentiel dans les ateliers. Les bureaux d'étude étaient aussi compartimentés par technologie. L'approvisionnement des matières premières était en revanche centralisé pour réaliser des économies d'échelle.

L'organisation tenait une position intermédiaire entre une production unitaire (avec des moyens regroupés autour du produit) et une production sériée (avec des moyens organisés en lignes et une circulation des produits).

La figure 1 ci-contre illustre comment une nomenclature de produit pouvait être découpée d'après les dominantes technologiques (micromécanique, câblages,...) conditionnant ainsi la répartition des étapes de sous-assemblage entre les unités productrices. Les systèmes tels que des lanceurs ou des satellites se décomposaient en dizaine de milliers de composants et plusieurs dizaines voir centaines de niveaux d'assemblage nomenclaturés.



Difficile de les faire circuler, pour des raisons sécuritaires, dimensionnelles et de cadences (petites et moyennes). On aurait pu s'attendre à un atelier flexible voir intégré si l'activité avait été mono-technologique (fabrications⁸ mécaniques de la SEP⁹) ou essentiellement dédiée à de l'assemblage (site d'intégration des étages d'*Ariane*). Mais compte tenu de la pluralité technologique et des concentrations explicitées plus haut, on observait une organisation en réseau d'unités spécialisées et interdépendantes. Au fur et à mesure que l'assemblage avançait, les circulations de kits et de sous-ensembles d'une unité à l'autre diminuaient jusqu'à ce que la taille des objets contraigne à leur immobilisation du fait de l'accroissement du temps et des coûts de transport au fur et à mesure de l'avancement des processus de production.

Evidemment, l'hétérogénéité technologique des produits complexifiait l'assemblage et intriquait les interdépendances entre les unités du réseau productif et avec le site d'intégration. Les différents sous-

⁶ Dassault (Suresnes), Motorola (Toulouse),...

⁷ Une analyse de ce type diligentée pour un centre de montage-câblage avait montré que l'installation d'un tour mécanique aurait rendu quasi-indépendant (en termes de flux) ce centre de réalisation. Mais d'un point de vue purement économique, l'achat de cette machine n'aurait pas été rentable.

⁸ Moteurs *Viking* et *Vulcain* pour les lanceurs *Ariane*

⁹ Société Européenne de Propulsion située à Vernon (78)

ensembles étaient pilotés depuis le site d'intégration mais le pilotage de chaque sous-ensemble était ensuite délégué à l'unité désignée comme maître d'œuvre d'après les compétences technologiques requises. S'en suivait un découpage puis une attribution des tâches et des responsabilités auprès des autres unités sollicitées, avec statut hiérarchisé de partenaire ou sous-traitant, en fonction de la quote-part de production allouée. Les unités convertissaient les matières premières en un produit de base pour une autre phase de conversion ou d'assemblage chez une voisine. Les composants s'intégraient successivement dans les unités partenaires puis finalement dans l'unité pilote (cas le plus fréquent). Le fonctionnement de l'intégration et du réseau d'unités autonomes reposait sur le respect des nœuds de contrats (Nakhla, 2001 ; Fassio, 2000) de type clients/fournisseurs, au sens qu'il prend en économie des organisations (Riordan et Cremer, 1987). Mais ce maillage contractuel résistait mal à la compression des cycles qui accentuait les intrications et donc les problématiques, dans un univers de plus soumis¹⁰ à des aléas fréquents et à un renouvellement permanent des processus et des produits.

1.2. Compression des cycles, instabilité des systèmes et nervosité des stratégies de planification

Gérer les systèmes complexes exigeait de contrôler l'explosion des besoins correspondant à des milliers de composants sur l'ensemble du réseau d'intervenants (internes et externes) puis de guider leur assemblage progressif en suivant les liens nomenclurés (Fig.2), dans le respect des gammes de fabrication et de contrôle. Il était nécessaire de mener une démarche globale autorisant un choix de stratégie de planification en amont du calcul des besoins et une articulation cohérente entre la planification de

l'intégration, du réseau productif et l'ordonnancement des ateliers. Théoriquement, le calcul des besoins devait pouvoir partir d'un plan de production afin de les étaler en remontant le temps et assurer leur disponibilité au bon moment. Pour cela, le calcul des besoins devait pouvoir s'appuyer comme dans une GPAO¹¹ classique sur les données techniques de fabrication, les nomenclatures de produits (Fig.2) et les gammes. L'ordonnancement devait pour sa part, pouvoir déterminer

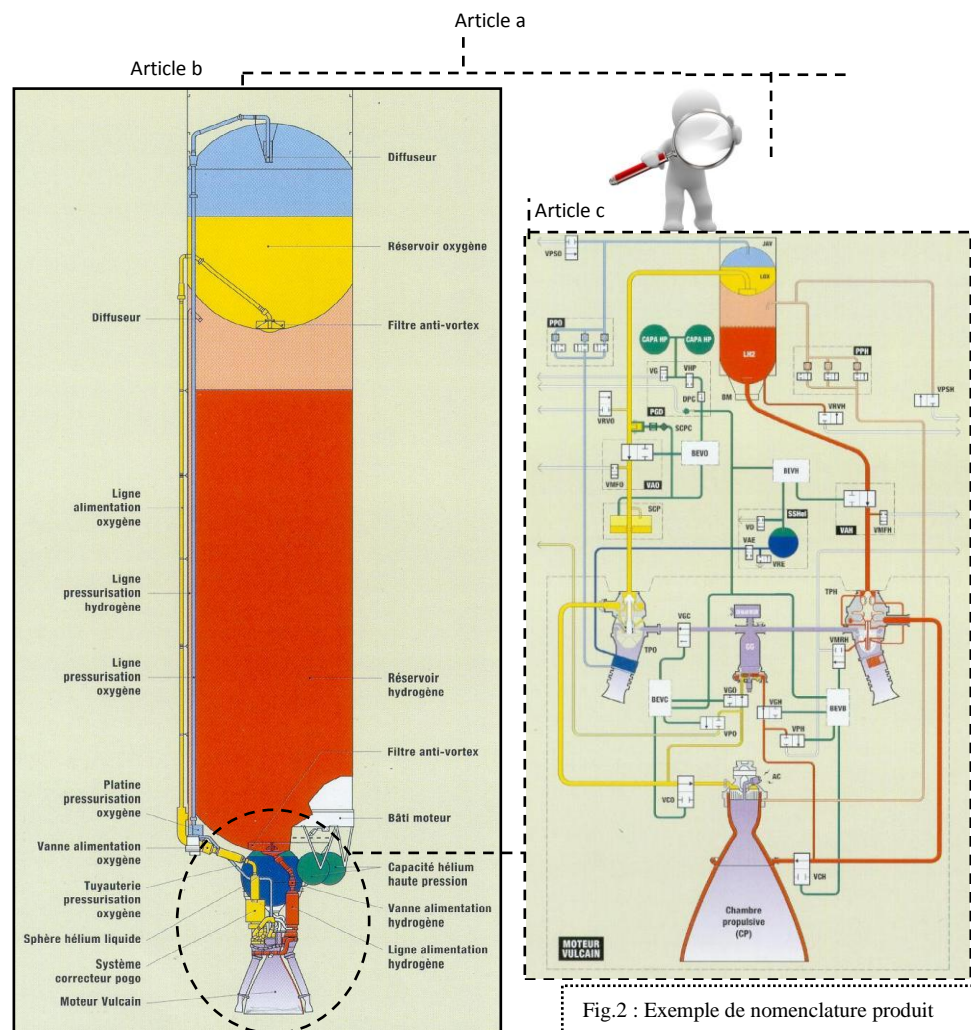


Fig.2 : Exemple de nomenclature produit

¹⁰ La nervosité du plan de production (nervousness) a été abordée dans la littérature en préconisant des solutions préventives. Mais dans le cas des systèmes complexes, elles étaient insuffisamment robustes face aux fortes perturbations structurelles.

¹¹ Gestion de Production Assistée par Ordinateur

un ordre de passage quand les ressources étaient communes et limitées. Mais en pratique, cette logique se défaisait dans l'organisation multi-centriste en place et sous le feu nourri des aléas et des évolutions. Les cycles pluri-mensuels offraient le flanc à l'évolutivité des produits et des technologies avec des impacts importants sur les processus, les encours et les plannings. La fréquence des tirs déversait régulièrement des trains de modifications, visant à satisfaire de nouveaux besoins du client, corriger des anomalies ou améliorer les coûts et les performances. Entre deux configurations consécutives, pour certains équipements (moteurs), les évolutions touchaient jusqu'à 60 % des constituants. Avec la compression des cycles, les multiples sous-ensembles coexistaient dans des configurations différentes tant dans les bases de données techniques que dans les ateliers. Cela amplifiait le problème de correspondance aux définitions déposées. Les autres conséquences de la compression des cycles étaient l'enflement des encours, l'engorgement des centres de réalisation et l'hypertension des flux.

Les perturbations d'origine externe (modifications demandées par les clients, report de tir...) et interne (pannes subites, sous-estimation de la durée des fabrications qui induisaient des attentes plus longues que prévues, retards d'approvisionnement, augmentation du taux de rebuts, etc) impliquaient des réajustements des ordres planifiés et/ou lancés. Ils ne pouvaient plus être mécaniquement absorbés. Les énergies et l'appareil gestionnaire se crispaient au point que tous les essais souhaitables étaient rarement possibles avant un tir. La littérature de la GPAO a depuis longtemps mis l'accent sur les problèmes d'hypersensibilité (Minifie et Davis, 1990) des planifications de besoins mais n'a progressé qu'en indiquant certaines logiques de prévention.

Dans ce contexte des systèmes complexes, le moindre retard sur un composant pouvait provoquer une dérive générale. Or, tout retard imputait, outre les coûts directs, des coûts induits encore plus astronomiques liés au manque à gagner pour le client dans l'exploitation d'un satellite. Afin de pouvoir planifier puis replanifier dans les meilleures conditions globales, il fallait peser et soupeser les conséquences des différentes actions correctives possibles. Toute politique de replanification devenait délicate, nécessairement exigeante et pour être cohérente, elle devait combiner plusieurs logiques d'action. L'accroissement des ressources (heures supplémentaires, passage en 3/8,...) et la livraison de produits provisoirement inachevés étaient des ressorts ultimes. Le recours massif à la sous-traitance externe pour réguler la charge et répondre ainsi aux chocs endogènes et exogènes, ne pouvait pas concerner 40% du volume des productions. De plus, sans une planification à long et moyen termes (écrêtage), la sous-traitance précipitée (délestage) était elle-même source de perturbations (délais incertains et aléas fournisseurs). Le recours à des stocks de sécurité était incompatible avec l'évolutivité des produits de haute technicité et la renégociation des délais inenvisageable dans un environnement hyperconcurrentiel. Les politiques d'accélération systématique des flux physiques et d'information généraient quant à elles des effets pervers (obsolescence, amplification du retard global moyen résultant des conflits de priorités, congestion des ateliers...). La structure gigogne et multi-centriste avait le désavantage de masquer aux coopérants la stratégie globale pour ne leur offrir que des vues parcellaires à l'intérieur des frontières issues du découpage technologique (Simon, 1955). Ils intervenaient sur des phases exécutées consécutivement ou parallèlement sans que des stratégies globales de replanification aient été définies en termes de performance et prescrites en termes de logiques d'actions (accélération, ralentissement, anticipations...). Chaque unité était à la fois pilote de certains produits, partenaire ou sous-traitante sur d'autres. Mais tous ces produits étaient destinés à l'intégration finale des étages. Or les unités pouvaient avoir tendance à opter pour des modes d'ordonnancement favorisant les fabrications pour lesquelles elles étaient pilotes au détriment de celles pour lesquelles elles étaient partenaires ou sous-traitantes. Par conséquent, les sous-ensembles sous-traités étaient systématiquement perturbateurs de plannings et les unités vivaient au sein de leurs ateliers, une congestion chronique au croisement des flux provenant des autres unités pilotes. Les dérapages de délais survenaient à ces goulots d'étranglement. En pratique, les replanifications s'exerçaient de manière collégiale à l'occasion de

réunions ad hoc mais s'avéraient complexes. Par exemple, lorsque le statut de pilote était décerné à l'unité ayant la technologie majoritaire sans qu'elle ne réalise l'assemblage final. Les conflits de priorité devaient être gérés en tenant compte de l'état d'avancement de tous les sous-ensembles.

Une part importante des déséquilibres observables dans la production des systèmes complexes tenait ainsi à la multiplication des efforts de corrections tentés par les planificateurs eux-mêmes, limités à des actions de replanification bien souvent inefficaces et même contre-productives. Certaines bases théoriques ainsi que des représentations partagées faisaient défaut pour une compréhension globale des rouages et une régulation performante de l'action collective (Hatchuel et Sardas, 1991 ; Woodward, 1965). L'orchestration de ce réseau complexe d'unités productrices devait donc être repensée dans ses mécanismes fondamentaux (partage des rôles, des tâches et des responsabilités avec un management coordonné, suivi des performances...). Cette orchestration, comme nous allons le voir, conditionnait la qualité des données techniques (nomenclatures, gammes) devant alimenter un système d'informations (Marciniak, Rowe, 2008) composite exigeant d'articuler de manière efficiente plusieurs outils de gestion.

1.3. Une instrumentation hybride devant combiner les modèles PERT, MRP-I et Ordonnancement dans une organisation idoine

Les productions complexes exigeaient de combiner différents outils de planification car elles s'apparentaient à des productions à la commande tout en exigeant une sériation des équipements. Cela leur avait valu d'être qualifiées de *multi-unitaires*. La planification de l'intégration finale des étages de chaque lanceur était réalisée au moyen d'un outil de type PERT¹², caractéristique d'une gestion de projet unitaire. Aucun lanceur ne ressemblait à un autre, chaque configuration dépendant de la charge utile transportée (satellites). La planification des sous-ensembles réalisés in situ, était pilotée au moyen d'un outil de type *Management Ressources Planning* (MRP)-I, davantage dédié à la production d'objets en petites et moyennes séries requérant de l'assemblage (de nombreux sous-ensembles étant communs à plusieurs lanceurs). Il était couplé¹³ à un Ordonnancement des ateliers pour la réalisation des composants de base dont la fabrication était répartie sur différentes unités spécialisées. Les systèmes complexes exigeaient d'articuler ces trois types d'outils de gestion, aucun ne pouvant convenir à lui seul (Hatchuel et Sardas, 1991).

Les méthodes de gestion et les modèles sous-tendus ont chacun un domaine de prédilection. Le métier de l'entreprise, sa position sur le marché, son histoire, influencent le mode de gestion (Chaussier, 1985 ; Hamichi et alii, 1986). Aux frontières des zones d'influence, le choix d'un modèle unique est délicat. A cette question d'une adéquation des outils de gestion, dans une configuration hybride, aux spécificités de l'activité, s'ajoutait la question d'une cohérence avec l'organisation idoine que nous avons précédemment décrite (Cf.1.1).

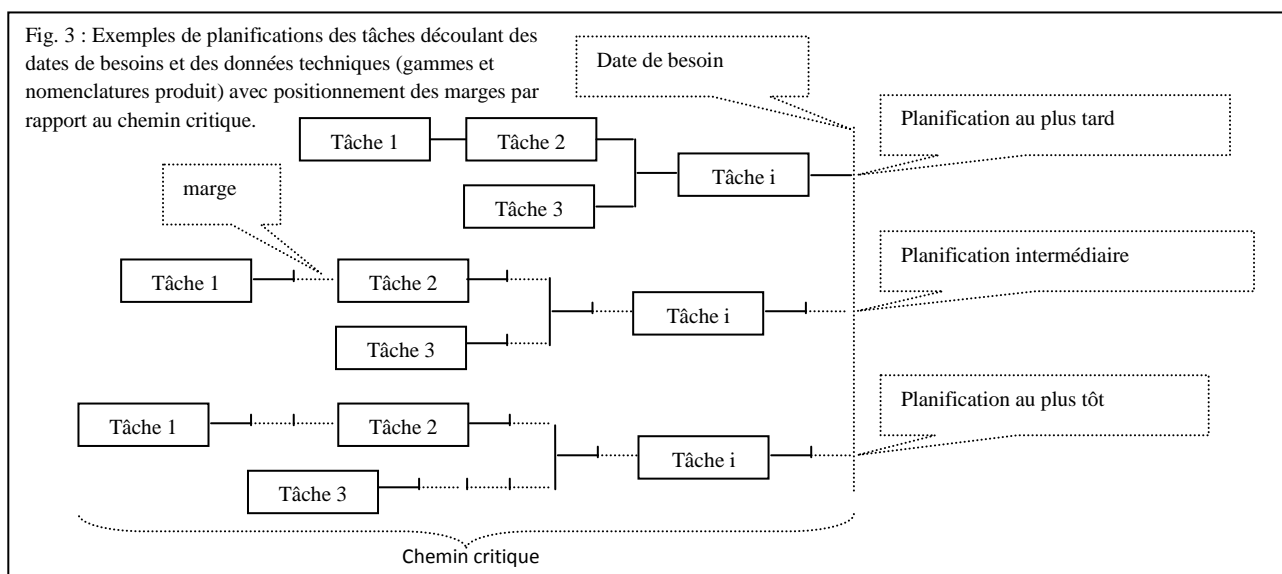
L'instrumentation gestionnaire était supposée permettre une planification et un contrôle de la production puis de l'intégration des étages, avec un suivi de l'avancement des sous-assemblages, un ordonnancement des processus (quantités, délais et priorités), une coordination d'ensemble et aussi un contrôle-qualité pour prévenir les écarts par rapport aux définitions déposées. De nombreux travaux de recherche avaient montré que les outils n'étaient jamais neutres par rapport à l'organisation (Hatchuel et Moisdon, 1984). Ils étaient toujours porteurs d'une organisation implicite indispensable. Elle ne pouvait être plus ou moins déphasée par rapport à l'organisation dans laquelle ils étaient censés fonctionner. En l'occurrence, la dérive qualitative des données

¹² Project Evaluation & Review Technique (planification de projet)

¹³ Par rapport au MRP-I, le MRP II prend en compte l'ajustement charge-capacité (Ordonnancement). L'articulation entre le MRP-I et l'Ordonnancement était une situation de transition vers un MRP-II.

techniques (gammes et nomenclatures) et le manque de robustesse des plannings (Cf.1.2) étaient révélateurs d'un tel déphasage.

Le puzzle technologique des systèmes complexes se retrouvait au sein des données techniques qui reflétaient les relations entre les acteurs (bureaux d'études, agents des services méthodes et opérateurs relevant d'unités distinctes). Les difficultés de coordination coïncidaient avec les découpages technologiques des gammes opératoires (prescription des étapes à respecter et des moyens à mettre en œuvre pour passer d'un état à un autre) et des nomenclatures (décomposition arborescente en niveaux d'assemblage hiérarchisés). Par conséquent, les planifications générées morcelaient les chemins critiques avec des phases réalisées dans les unités pilotes et des phases réalisées dans les unités sous-traitantes. Par ricochet, les critères de synchronisation, d'allocation des marges et de gestion des priorités étaient indépendants du positionnement des tâches sur le chemin critique ou en dehors. La représentation de la nomenclature d'assemblage sous forme arborescente permettait de calculer le chemin critique dont la longueur était prise comme cycle théorique du produit. Elle déterminait la date de lancement en fabrication de chaque article de la nomenclature en fonction de la date contractuelle du client et les marges locales et globales disponibles. Cette information était ensuite utilisée pour choisir une stratégie d'allocation de ces marges (totalement, partiellement ou pas du tout). Cette pratique générait des plannings (Fig.3) dits *au plus tôt* (fabrication dès que possible pour bénéficier de toute la marge), *au plus tard* (fabrication juste avant l'expiration du temps nécessaire à la réalisation plus une marge) ou *intermédiaires* selon le cas (enflement des encours, congestion des ateliers, risques d'obsolescence...).



Mais les unités privilégiaient les phases qu'elles pilotaient même lorsqu'elles se situaient hors du chemin critique, au détriment de phases qui leur étaient sous-traitées et qui se situaient sur le chemin critique. Cette logique s'opposait à un réajustement pertinent des priorités en fonction de l'évolution des événements. Le chemin critique pouvait se déplacer au cours du temps et les unités n'étaient pas en mesure de savoir si les phases concernées affectaient ou non le chemin critique. Les marges étaient du coup positionnées entre les phases pilotées et les phases sous-traitées, à concurrence des limites posées par les risques d'obsolescence et le volume d'encours. Lorsqu'elles s'inséraient sur le chemin critique la conséquence était un étirement du cycle de production. L'ajout de marges par les unités pilote réduisait la priorité des opérations réalisées dans les unités sous-traitantes. La règle d'ordonnancement considérait les dates de besoins exprimées et plus la marge cumulée se réduisait plus le risque de retard était supposé augmenter (calcul de la Marge Globale Restante). En termes de performances, cette règle était a priori plus efficace qu'une règle

arbitraire, par exemple la tâche la plus courte, qui n'aurait pas intégré la destination de l'article enlevant la priorité à tous ses concurrents. Mais le calcul des retards était faussé car l'ensemble du chemin critique n'était pas maîtrisé. La réactualisation en fonction de l'avancement réel aggravait l'allongement du cycle et les planifications dérivait alors vers une logique *au plus tôt* qui congestionnait les ateliers.

Les stratégies de replanification supposaient une maîtrise des dépendances entre les besoins planifiés solidarisés au niveau des liaisons nomenclaturées (PERT) de l'intégration des étages. Mais ces plannings généraux de même que les chemins critiques, étaient aussitôt décousus par variété technologique au niveau de la planification MRP-I. Avec l'éclatement des données techniques, toute action de replanification d'un ordre se faisait nécessairement au détriment des autres, sans visibilité des liens de fratrie entre les produits entrés au plan de production. L'Ordonnancement était découplé des plannings généraux, en contradiction avec la Méthode des Anticipations Dynamique (Kabèche, 1996, Hatchuel, Saidi-Kabèche et Sardas, 1997). Cette méthode calculait d'abord le chemin critique à partir de données techniques (gammes et nomenclatures d'articles) supposées connues. Elle déterminait ensuite la date de lancement en fabrication de chaque article connaissant la date contractuelle du client. Elle préconisait alors la génération de plannings avec une restriction maximale des marges locales et globales disponibles (ajoutées notamment par les planificateurs pour pallier aux attentes et/ou aux infidélités des composants) sur le chemin critique et l'exploitation maximale des marges sur les autres chemins.

Nous arrivons au terme de cette première partie consacrée à l'analyse des problématiques organisationnelles et instrumentales. Nous avons privilégié une lecture de ces problématiques en considérant les caractéristiques des activités et des produits comme des nécessités imposées à l'organisation (délégation, coordination, évaluation...) et à l'instrumentation gestionnaire (Moisson, 1991). L'activité spatiale avait ainsi adopté une configuration organisationnelle marquée par un découpage hiérarchisé intégrateur/réseau d'unités spécialisées par technologie, observable dans les secteurs de pointe où les spécialisations étaient souvent les raisons irréductibles de distinction des entités productrices. Cette forme organisationnelle cherchait à répondre à une double nécessité : regrouper des moyens peu duplicables dans un contexte de petites et moyennes séries et concentrer les compétences pour promouvoir l'innovation technologique et répondre rapidement aux nouveaux marchés. Le découpage de l'objet à produire, recoupait ainsi avec les ressources mobilisées pour sa réalisation (en fait les grandes spécialités technologiques) et faisait reposer le déroulement des fabrications et de l'assemblage sur la coordination des différents acteurs, amenés à intervenir à plusieurs reprises tout au long du processus. Sur le plan instrumental, l'analyse des dysfonctionnements des outils PERT, MRP-I et Ordonnancement montrait que l'éclatement entre l'intégrateur, les unités du réseau productif et les sous-traitants extérieurs, dissipait la visibilité globale sur la dépendance des besoins entrés au Plan de Production suivant le niveau hiérarchisé auquel les producteurs se situaient : niveau PERT ou niveau MRP-I. Cela conduisait à un morcellement du chemin critique et à un positionnement des marges aux frontières du découpage technologique indépendamment du chemin critique global, en contradiction avec la *Méthode des Anticipations Dynamiques*. Ce schéma n'offrait en effet aux acteurs qu'une vision parcellaire des produits et des plannings. Il s'opposait de facto à l'exercice d'une logique d'actions coordonnées et à la gestion globale et pertinente des priorités (Ordonnancement). En particulier face aux fortes perturbations structurelles liées à la nature de l'activité et que les outils de planification ne permettaient pas de maîtriser dans un tel contexte.

2. Remaniements organisationnels et nouveau formalisme de définition des systèmes

« Les grandes transitions industrielles s'expriment souvent, ou tout au moins d'abord, par une crise de la production » (Pessis-Pasternak, 1989). Sur le plan organisationnel, les performances du

système étaient totalement dépendantes du pilotage de la politique de replanification et de la coordination multi-latérale et simultanée des différentes unités à la fois entre elles et avec l'intégrateur. Cela réclamait une centralisation des fonctions de pilotage au dessus du découpage technologique des produits voulu par l'activité. L'ordonnancement, l'allocation des marges et la gestion des priorités devaient être décidés en regard de la planification d'ensemble et les replanifications fréquentes qui déstabilisaient les prévisions, exigeaient de combiner plusieurs logiques d'actions (Adam et al., 1987 ; Bean et al., 1991) pour redéployer les ressources de manière optimale (accélération et ralentissement, tenant compte de l'état de congestion des ateliers conformément aux préconisations de la Méthode des Anticipations Dynamiques).

La nécessité de faire coexister les modèles PERT, MRP-I et Ordonnancement, dont l'articulation était aussi difficile à maintenir face aux instabilités de définition des objets à produire, provenait quant à elle de la très difficile question de la gestion des évolutions de définition. Les entreprises issues des secteurs de pointe devaient avant tout leur survie à leurs avancées technologiques et les concepteurs étaient contraints d'adopter des formalismes appropriés à ce contexte pour gérer la définition des objets et ses évolutions successives. Par conséquent, le contrôle des configurations d'intégration était unitaire, long, complexe et exigeait un outil de type PERT. Les surcoûts engendrés étaient censés pouvoir être compensés par un outil de type MRP-I couplé à un Ordonnancement pour la gestion des équipements intermédiaires semi-finis. L'élargissement du cadre des réflexions à l'univers de la conception avait ainsi mis en évidence une contingence de l'innovation (Akrich, 1992) à l'origine des combinaisons de systèmes gestionnaires observables en production pour en absorber les effets de diversification et de renouvellement des produits et des organisations. Cette nécessité de digérer l'explosion de l'innovation concernait l'ensemble du monde industriel (Guilhon, 1993).

2.1. Remaniements organisationnels et centralisation des fonctions de pilotage d'une production multi-centriste

Les possibilités de recomposition organisationnelle imaginées puis mises en œuvre devaient recréer des communications mieux structurées à trois niveaux, entre l'intégrateur (gestion PERT) et le réseau d'entités autonomes (gestion MRP-I), à l'intérieur de ce dernier et au sein de chaque unité afin de surmonter des difficultés aiguës de coordination (Ordonnancement). Le pilotage décentralisé était dans ce contexte incompatible avec le modèle MRP-I couplé à l'Ordonnancement, de même qu'avec la Méthode des Anticipations Dynamiques (Kabèche, 1996 ; Hatchuel, Saidi-Kabèche et Sardas, 1997). Il était nécessaire de trouver un nouveau compromis conservant l'acquis de la décentralisation des ressources par spécialités technologiques tout en renforçant les liens intégrateur/producteurs et la coordination du réseau productif (couplage PERT et MRP-I puis MRP-I et Ordonnancement). Le réseau pouvait ainsi accroître ses performances en assurant une cohérence des données techniques et en adoptant une logique où les stratégies de resynchronisation combinaient accélérations et ralentissements sélectifs, en tenant compte de l'état de congestion des ateliers et de l'état de compression des plannings initiaux.

Les réflexions se centrèrent sur une nouvelle division du travail (Taylor, 1911) qui touchait principalement les services méthodes et les planificateurs, des acteurs issus du taylorisme. Le pilotage des données techniques de production devait permettre :

- d'éviter les ruptures de nomenclature dont les niveaux étaient ventilés sur différentes unités de production,
- d'éviter le morcellement des chemins critiques,
- d'assurer la pertinence du découpage en postes de travail
- d'assurer la fiabilité des gammes notamment en termes de temps alloués.

Partant de l'idée que les savoirs technologiques n'étaient pas un préalable nécessaire pour maintenir à jour une nomenclature d'articles composant les produits finaux, une fonction de préparation *nomenclaturiste* avait été créée pour piloter les nomenclatures des produits, au dessus du découpage technologique tandis que des préparateurs *gammistes* géraient les gammes opératoires correspondant à leurs compétences technologiques. En définitive, les préparateurs *nomenclaturistes* étaient ceux des unités pilotes du produit et les préparateurs *gammistes* étaient ceux des unités sous-traitantes. Cette nouvelle répartition des rôles et des responsabilités reconstruisait un référentiel gestionnaire a priori plus favorable à la préservation de la qualité des données techniques et aux spécificités des systèmes complexes (Hatchuel et Weil, 1992 ; Molet, 1997). Le rattachement hiérarchique des fonctions Méthodes Préparation et leur colocalisation au sein d'une unité nouvellement créée, dédiée à l'organisation, à la productique et à la GPAO, présentait l'avantage d'une position neutre vis-à-vis de chaque unité, quel que soit son statut, pilote ou sous-traitante. La centralisation des fonctions d'ordonnancement avait en revanche préservé la délocalisation au sein des unités. L'ensemble des planificateurs devait pouvoir considérer identiquement les produits quel que soit leur statut, piloté ou sous-traité. Pour les produits gérés en sous-traitance, les plannings des pilotes concernés devaient pouvoir être partagés afin que les règles d'ordonnancement appliquées dans les ateliers puissent être choisies de manière cohérente avec ces plannings. La gestion des priorités des ordres dans les files d'attente et la réallocation des ressources nécessitaient une entière visibilité sur la vie des produits et aussi une position de neutralité vis-à-vis des unités du réseau. Une fois le découpage industriel accompli, le service Ordonnancement central, assurait une coordination des différents ateliers, par un suivi délocalisé, au plus près de la production. Il était important que l'ordonnancement de ces ordres puisse être conduit en ayant une vue panoramique. Seul un ordonnancement centralisé le permettait. Cependant la diversité des technologies représentées obligeait les planificateurs à rester spécialisés au faite des contraintes de la fabrication : pannes diverses, absence de personnel en dernière minute, réajustement des ressources... Pour ces raisons, leur localisation géographique demeurait dans chaque unité, proche de la réalité des ateliers. A plus long terme, un retrait prolongé des agents des services Méthodes Ordonnancement aurait pu, dans un contexte technologique fortement évolutif, rendre obsolètes leurs savoirs pour établir un simple délai de fabrication ou estimer le coût d'une pièce.

Pour qu'une politique d'allocation des marges tenant compte des chemins critiques puisse être redéfinie et qu'une articulation entre le moyen terme pour le calcul des besoins et le court terme pour l'Ordonnancement d'ateliers puisse être assurée, l'ensemble des planificateurs devaient nécessairement travailler ensemble. Ceux-ci avaient opéré antérieurement de manière indépendante et cloisonnée, dans des unités productrices distinctes et sous des hiérarchies différentes. Un responsable du Plan de Production avait été désigné pour piloter les différentes commandes entrées en termes de quantité, références, délais afin de coordonner les interactions entre le PERT et le MRP-I. Rappelons que les besoins entrés au plan de production du MRP-I, théoriquement indépendants entre eux et générant la cascade des besoins dépendants par déclinaison des niveaux de nomenclature, étaient en fait dépendants car solidarisés par la nomenclature PERT (Cf.1.3). Sur le réseau, les ordres de fabrication réalisés dans des ateliers différents étaient donc liés. Au fur et à mesure de l'avancement des étapes de fabrication et de sous-assemblage, il fallait en permanence tenir compte des dates finales de livraison solidarisées par le planning PERT. Il était important que les liens avec l'intégration soient consolidés. D'abord par le choix des règles basées sur la marge globale restante, qui tenaient ainsi compte des dates finales des besoins. Ensuite, par une gestion, au niveau de l'intégration, de règles d'Ordonnancement cohérentes avec le planning PERT¹⁴ (Giard, 2003 ; Giard et Jeunet, 2006 ; Giard et Mendy, 2008), de manière à réduire les dérives conformément à ce que préconisait la Méthode des Anticipations Dynamiques. Enfin, par la centralisation de l'Ordonnancement qui simplifiait les liaisons avec le réseau d'unités et permettait d'appliquer des stratégies de retardement ou

¹⁴ Le PERT, dans sa version standard, n'intègre que des contraintes potentielles et l'ajustement charge-capacité s'effectue par simple déplacement de tâches. D'où l'intérêt du couplage PERT et MRP-I. L'Ordonnancement procède par transfert de charge sans toujours en préserver les caractéristiques (durée, dates de début relatives à une période antérieure, fractionnement éventuel...)

d'accélération pertinentes par rapport aux besoins de l'intégration et cohérentes avec l'état de congestion des ateliers du réseau.

Les nouveaux savoirs indispensables pour comprendre et maîtriser la finesse des décisions multicritères (marge globale restante...) d'une stratégie de replanification efficiente (accélération, retardement, congestion des ateliers) se tissaient dans cette collaboration plus fréquente et plus étroite avec les spécialistes de la GPAO. L'assistance, la compréhension mutuelle, accéléraient l'apprentissage (Moisdon et Weil, 1998). Le décalage se creusait en revanche avec les ateliers des unités qui avaient cédé une part de leur autonomie de décision et devenaient davantage exécutants. Les unités se recentraient sur la part de l'activité dédiée aux développements, à la diversification et à la recherche de nouveaux marchés. Mais les arbitrages pour la répartition des ressources au sein des unités, entre prototypes et engagements fermes sur les séries en cours, étaient par conséquent difficiles. Le croisement des méthodes et des ressources fonctionnait sur un principe matriciel.

La combinaison des outils de type PERT, MRP-I et Ordonnancement révélait la double nécessité de gérer unitairement les configurations d'assemblage et de reproduire en petite et moyenne séries. Les raisons de l'impossibilité de gérer à la fois le réseau d'unités mais aussi l'intégration au moyen d'un outil unique de type MRP-II reposait sur les formalismes de gestion des évolutions de définition. Les recherches se sont donc tournées vers le renouvellement des produits soumis à une innovation permanente et sur la gestion des définitions successives à l'origine du phénomène de diversification des productions et du délicat problème de l'interchangeabilité des objets techniques (Chandler, 1977 ; Cohen 1994).

2.2. Nouveau formalisme de définition des systèmes

La gestion des évolutions de définition peut être considérée comme une forme première de la replanification. C'est à partir des données de définition des produits et composants (nomenclatures, plans, spécifications...) que les données de production (nomenclatures, gammes...) sont déterminées. Ces dernières sont à la base des planifications. Les évolutions de définition sont susceptibles donc de modifier les ordres de fabrication et d'assemblage. La définition des objets à produire n'est jamais figée dans l'activité spatiale comme dans toutes les industries aux technologies avancées. Des ordres externes (nouvelles spécifications formulées par le client...) ou internes (amélioration d'un procédé de fabrication ou d'un équipement dont le comportement lors du dernier tir n'a pas été jugé suffisamment satisfaisant...) sont à l'origine des évolutions de la définition. La longueur des cycles de production et l'évolution rapide des techniques et des technologies se conjuguent pour faire de la gestion des évolutions de définition un réel problème de correspondance entre les objets produits et les définitions déposées. La définition d'origine au moment du lancement en production et celle des produits livrés peuvent différer substantiellement. Aux portes de la production se talonnent à grande fréquence, des évolutions de définition provenant des bureaux d'études avec une imminence d'application. La longueur des cycles de réalisation fait se côtoyer différentes générations de produits. Avec des nomenclatures de taille importante et des impératifs de calendrier de plus en plus serrés, il devient difficile de gérer les stocks et les dépendances de besoins en garantissant l'assemblage des bons composants, au bon moment, dans leur bonne définition. D'où l'adoption de l'outil PERT pour l'intégration finale de chaque lanceur dans le respect de la configuration prescrite et attendue par le client, plutôt que l'outil MRP-II.

Cette question de la gestion des évolutions de définition a été généralement traitée à partir de règles classiques et normées qui construisent la notion d'interchangeabilité (fonction et utilisation identiques). Les évolutions de définition sont hiérarchisées en fonction des répercussions qu'elles provoquent. Cette notion d'interchangeabilité permet théoriquement de différencier les données permanentes (inchangées) et celles modifiées. Or les travaux menés avec les acteurs de l'entreprise

ont permis de montrer que ces règles sont difficilement applicables tant sur le plan pratique de leur mise en œuvre que sur le plan de la philosophie qui les sous-tend, celle d'une interchangeabilité totale¹⁵, le plus souvent trop risquée pour une industrie sécuritaire comme l'industrie spatiale.

Ces règles s'opposent à tout formalisme unifié qui permettrait une planification globale de la production. Concepteurs, producteurs et contrôleurs ne peuvent parvenir à concilier leurs contraintes mutuelles et à s'entendre sur l'élaboration d'un référentiel commun, unique, valant pour les sauts technologiques et pour les modifications mineures. Un nuage d'évolutions mineures pouvant par exemple avoir une répercussion globalement majeure. Les concepteurs doivent théoriquement classer les objets à reproduire en deux catégories : différents ou identiques. Ce qui revient à prononcer la rupture ou la conservation de l'interchangeabilité. La rupture signifie la création de nouveaux produits et l'explosion de la diversification. La conservation en valeur absolue est inaccessible car elle exige des études combinatoires irréalisables. L'appréciation varie donc avec les référentiels (définitions, règles, normes, procédures sécuritaires)¹⁶ et les référentiels changent avec les observateurs (concepteurs, producteurs, contrôleurs, client...). Cette dichotomie est en définitive inapplicable et inappliquée sauf à étendre considérablement (voire infiniment) les cycles de conception. Les concepteurs génèrent par défaut des produits à configuration variable mais à identification inchangée (multi-formes) qui sous-entendent une interchangeabilité définie de manière relative et conditionnelle (Giacomoni et Sardas, 2010). Une telle notion rend les systèmes d'information et les outils de G.P.A.O inopérants. Ce faisant, les concepteurs se créent un mode de gestion des évolutions plus approprié certes à leurs contraintes. Mais en production (comme en maintenance) tous les efforts déployés pour instrumenter et organiser de manière efficiente les centres de réalisation sont bloqués. Il faut par conséquent trouver les clés de la modélisation de la définition des objets complexes (Simondon, 1958) en cohérence avec le système gestion de la production, sachant que leur nature évolutive engendre des multiformes (objets à configurations multiformes).

Les solutions finalement retenues ont exigé de généraliser les pratiques des concepteurs aux autres acteurs concernés (producteurs et contrôleurs) et de réviser les modes d'application des règles normées de l'aéronautique partagées par les partenaires européens. Le formalisme de nouvelle génération consiste à distinguer les éléments constants et ceux variables entre une configuration donnée du système et une autre modifiée. Les éléments variables sont reliés à la configuration modifiée, les éléments constants sont reliés aux deux configurations. Le processus se reproduit pour les configurations modifiées successives. Ainsi, à chaque élément nomenclaturé est associé une classe de configurations du système pour lesquels l'élément est compatible et donc interchangeable. A dessein, les configurations successives de la définition des systèmes sont regroupées en classes d'équivalence dont les représentants permettent de redéfinir une interchangeabilité relative et conditionnelle. De même, pour un élément donné, les compositions successivement générées et qui

¹⁵ "Pour un besoin déterminé, aptitude commune à des éléments, de fabrication ou de conception différentes mais de fonctions identiques, à être substitués les uns avec les autres selon des critères bien définis, sans retouche, modification ou sélection de ces éléments et sans modification des fonctions, des performances ou des matériels de mise en œuvre et de maintenance" (Norme AFNOR NF L 00-0007 ind B).

¹⁶ Le rapport (public) de la Commission d'enquête Ariane 501 nous en donne un exemple : (...) « on a pris un risque incontestable en supposant qu'un équipement critique tel que le SRI (*Système de Référence Inertielle*) était validé du seul fait de sa qualification ou de son utilisation antérieure sur Ariane 4 » (...) il n'est pas opportun, sauf preuve contraire, de procéder à des modifications sur des logiciels qui ont bien fonctionné sur Ariane 4 (...) la première partie de la trajectoire d'Ariane 5 diffère de celle d'Ariane 4 (...) une variable interne liée à la vitesse horizontale du lanceur a dépassé une limite inscrite dans le logiciel de ce calculateur (...) l'ordre de procéder à une correction importante de trajectoire par rapport à une déviation qui, en fait, ne s'était pas produite. » Recommandations de la Commission : « (...) La Commission a quelques raisons de penser que ce principe a également été appliqué à d'autres domaines de la conception des logiciels d'Ariane 5 (...) Déclarer tous les logiciels critiques comme des produits à configuration contrôlée (CCI). »

sont demeurées interchangeables constituent une classe d'équivalence, nécessairement relative à la classe d'équivalence des configurations du système garante de l'interchangeabilité des compositions. Il faut ensuite refondre les principes d'identification des objets en fonction des classes de compositions et des classes de configurations. Cette logique peut satisfaire les différents protagonistes. Elle rompt avec le principe habituel d'applicabilité à une date ou un numéro d'exemplaire (modification à appliquer à compter du n^{ième} produit) impropre à la gestion de production sériée et avec le principe d'interchangeabilité absolue inapplicable dans le contexte des productions complexes. La combinaison (&) du représentant de la classe d'équivalence des compositions (\hat{C}) et du représentant de la classe d'équivalence des configurations (\hat{C}) donne toutes les informations nécessaires pour reconstituer la définition individuelle et contextuelle d'un article¹⁷. Cette nouvelle identification des objets permet une généralisation des solutions existantes mais aussi en devenir [Systèmes de Bases de Données Relationnelles (SGBD), Entreprise Ressource Planning (ERP), Product Lifecycle Management (PLM)...] basées sur une gestion dynamique des liens entre les éléments (Codd, 1970, 1990 ; Bistarelli et Al., 2003 ; Djeddar, 2003 ; Rousseau 2005 ; Stark, 2004). Si ces solutions peuvent éventuellement permettre de reconstruire les compositions et les configurations souhaitées, elles ne permettent cependant pas d'assurer une correspondance avec un discernement physique des objets (marquage) tout au long de leur cycle de vie. Sauf à les distinguer systématiquement ce qui est évidemment impossible. Le modèle d'une identification redéfinie est donc une solution innovante et originale qui permet de planifier les configurations directement attendues par les clients à partir des nomenclatures validées par les bureaux d'études. Cette modélisation reconsidère les modes d'applications des conventions internationales des métiers de l'Aéronautique qui n'autorisent que deux formes : mutation du composant sans mutation du composé et mutation du composé sans mutation du composant.

Sur le plan organisationnel, les concepteurs s'étant organisés comme les producteurs par spécialité technologique, la cohérence d'ensemble est demeurée sous le contrôle de l'architecte industriel. Les services Méthodes Préparation devenant dans ce schéma, les correspondants privilégiés des bureaux d'études et des contrôleurs. Cette structure qualifiée de matricielle, a visé la maîtrise des interactions et des interfaces, donc des flux d'échange d'informations et de matières pour compenser le découpage des produits et la ventilation des attributions.

Conclusion

La mise en cohérence du système de production a pris en compte les spécificités de l'activité, l'hétérogénéité des outils de planification et d'ordonnancement et la dimension organisationnelle. Les recherches ont conduit à repenser la division du travail, en restreignant l'autonomie des unités au niveau du pilotage des productions entrées en phases séries (gestion des ressources humaines, matérielles et organisationnelles des ateliers, de la prise de commande à la livraison) et en redonnant la priorité au développement et à la réalisation des prototypes entrant dans une filière technologique. La centralisation du pilotage des productions s'est construite avec les services Préparation et Ordonnancement. L'objectif a été une gestion plus efficiente des plannings et de l'ordonnancement face aux fortes perturbations structurelles, notamment :

- positionnement des marges hors des chemins critiques et non à la frontière des découpages technologiques entre les unités
- maintien de la cohérence des nomenclatures et des gammes
- couplage de règles de priorité avec les plannings généraux

Cette nouvelle option organisationnelle a été une condition nécessaire à l'amélioration de la coordination des tâches dans les divers ateliers mais aussi avec le Site d'intégration. L'objectif a été d'assurer, tout au long de l'avancement des programmes de production, un respect des délais dans

¹⁷ Il suffisait de généraliser ce principe en cas de découpage gigogne des objets exigeant par exemple de considérer des configurations de configurations : (\hat{C})^{^...} & (\hat{C})^{^...}

l'enchaînement de ces tâches qui relèvent de compétences technologiques hétérogènes. Pour accompagner cette nouvelle organisation, des rôles ont été redéfinis ou créés, l'organigramme hiérarchique redessiné, la localisation repensée en termes de réactivité et de pérennité des savoirs-faire. La réflexion s'est tournée aussi vers des actions d'accompagnement (nouvelles procédures, formation, remise à jour des bases de données techniques) et la définition d'indicateurs de performances et d'anomalies.

Les recherches ont montré aussi que les problématiques de replanification doivent considérer la question de la gestion des évolutions de définition et les relations entre la conception et la production. Les systèmes complexes présentent des spécificités telles que l'évolutivité des produits et la survivance des générations successives qui ne trouvent pas de formalismes satisfaisant les contraintes à la fois des concepteurs, des producteurs et des contrôleurs. Les solutions apportées nécessitent de repenser les règles de gestion des évolutions de définition, l'identification des produits et leur interchangeabilité au sein des systèmes d'information et de la G.P.A.O. Les réflexions et les modèles élaborés permettent ainsi de solutionner des problématiques génériques nées de la nécessité de reproduire des objets complexes fortement évolutifs tant d'un point de vue théorique que pratique.

Le caractère multi-unitaire des systèmes complexes révèle finalement la nécessité d'une mise en cohérence permanente des modèles gestionnaires de production et de conception au fil des évolutions industrielles observables sous l'effet de l'innovation et de la sériation des objets. Il serait sans doute opportun de faire progresser la réflexion sur la manière de gérer cette forme de « contingence » et de « dualité » entre une *capacité d'innovation* et une *capacité d'absorption* de l'innovation.

Bibliographie

- Adam, Will, Bertrand, Sulzakis, 1987, « Priorités assignment procedures in multi-level assembly job shops », IIE Transactions, Volume 19, Number 3,
- Akrich M., 1992, The De-scription of Technical Objects, In Bijker W., Law J., ed, Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change, Cambridge Mass., MIT Press,
- Bean, J.C., Birge, J.R., Mittenhal, J., Noon, C.E., 1991, "Matchup scheduling with multiple resources, release dates and disruptions". Operations Research 39,
- Bistarelli, S., Faltings B., Neagu N., (2003), "A Définition of Interchangeability for Soft CSPs", Proceedings of the 2002 Joint ERCIM/CologNet international conference on Constraint solving and constraint logic programming,
- Burns T., Stalker G.M., 1961, *The Management of Innovation*, Londres, Tavistock.
- Chandler A., 1977, *The Visible Hand*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Chaussier J.F., 1985, Gestion de Production. Concepts typologie perspective, CETIM,
- Codd E.F., (1990), "The relational model for database management", version 2, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Codd E.F., (1970), "A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks", *IBM Research Laboratory, San Jose, California*, CACM 13, N°6, June, Information Retrieval P. Baxendale, Ed.,
- Cohen Y., 1994, Pour penser la technique, Alliage n° 21,
- Cremer J., Riordan M.H., 1987, "On Governing Multilateral Transactions with Bilateral Contracts," Rand Journal of Economics, The Rand Corporation, vol. 18(3),
- Crozier M., Friedberg E., 1977, *L'Acteur et le Système*, collection Points, éditions du Seuil.
- Djezzar L., (2003), *Gestion de configuration*, Dunod, Paris,
- Fassio G., 2000, « Quels partages entre acteurs de l'interface « approvisionnements » dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile ? », Les Troisièmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique, Trois-Rivières, 9, 10 et 11 mai,
- Giacomoni G., 2002, *Gérer la définition et la reproduction d'objets complexes dans les contextes d'innovation permanente. Le cas de l'industrie de l'ESPACE*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris,
- Giacomoni G., Sardas J.-C., (2010), "P.L.M et gestion des évolutions de données techniques : impacts multiples et interchangeabilité restreinte", in *Actes du colloque AIM2010 : SI et Développement Durable*, ouvrage collectif Hermès Science Lavoisier,
- Giard V., (2003), *Gestion de la production et des flux*, 3e édition, Economica,
- Giard V., Jeunet J., (2006), "Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage", Journal Européen des Systèmes Automatisés, 40 (4-5),
- Giard V., Mendy G., (2008), "Scheduling Coordination in a Supply Chain Using Advance Demand Information", Production Planning & Control, vol. XIX, n° 7,
- Guilhon B., 1993, *Les dimensions actuelles du phénomène technologique*, l'Harmattan, Paris,
- Gupta Y. P., Somers T. M., 1996, "Business Strategy, Manufacturing Flexibility, and Organizational Performance Relationships : A Path Analysis Approach." *Production and operations Management Journal*,
- Hamichi S., Kiefer J.P. et coll., 1986, Les progiciels de la Gestion de Production, Ed. L'Usine Nouvelle,
- Hatchuel A., Moisdon J.C., 1984, Théorie de la décision et pratiques opérationnelle, le cas des investissements pétroliers, Sciences de Gestion, n°4,
- Hatchuel A., Sardas J.-C., 1991, « Les grandes transitions contemporaines des systèmes de production. Une démarche typologique », in De Terssac G., Dubois P., Les nouvelles rationalisations de la production, Toulouse, Cépaduès,
- Hatchuel A., Weil B., 1992, *L'expert et le système*, Paris, Economica,

Hatchuel A., Saidi-Kabeche D., Sardas J.-C., 1997, « Towards a new planning and scheduling approach for multistage production systems », *International Journal of Production Research*, vol. 35, N°3, pp. 867-886,

Kabèche D., 1996, *pilotage des productions dans les contextes multi-centristes*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris,

Marciniak R., Rowe F., (2008), *Systèmes d'information, dynamique et organisation*, Economica,

Maurice M., Sellier P., Sylvestre J.-J., 1982, *Politiques d'éducation et organisation industrielle. Une comparaison France-Allemagne*, Paris, Presses Universitaires de France

Minifie J.R., Davis R.A., 1990, « interaction effects on MRP nervousness », *International Journal of Production Research*, vol. 28, n°1,

Mintzberg, 1982, *Structure et dynamique des organisations*, Paris, Ed. d'Organisation,

Moisdon J.C., 1991, « La recherche au centre de gestion scientifique : évolutions et perspectives », Publication Centre de Gestion Scientifique,

Molet H., (1997), *Une nouvelle gestion industrielle*, Hermès Sciences Publica, Paris,

Moisdon J.-C., Weil B., 1998, « Capitaliser les savoirs dans une organisation par projet », in *Les Annales de l'École de Paris du management*, vol. IV,

Nakhla M., 2001, « Dynamique des contrats et innovation dans l'entreprise : évolution des modes de coordination et régulations économiques des projets », *Annales des mines, Série Gérer et comprendre*, n°66, décembre 2001,

Pessis-Pasternak G., 1989, *Faut-il brûler Descartes ?*, Editions la Découverte, Paris,

Rousseau F., (2005), *Conception des systèmes logiciel/matériel : du partitionnement logiciel/matériel au prototypage sur plateformes reconfigurables*, Thèse d'HDR, Université Joseph Fourier – Grenoble I,

Stark, J. (2004). "Product Lifecycle Management - 21st century Paradigm for Product Realization.", *Decision Engineering Series*, Springer Verlag, Berlin,

Simon H., 1955, «A behavioural model of rational choice», *Quarterly Journal of Economics*, n°69,

Simondon G., 1989, *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, Paris,

Taylor F.W., 1911, *The Principles of Scientific Management*, New York, Harper Bros.,

Tyagi R. K., Sawhney M. S., 2010, "High-Performance Product Management: The Impact of Structure, Process, Competencies, and Role Definition », *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 27, Issue 1, January,

Woodward J., 1965, *Industrial Organization Theory and Practice*, Londres, Oxford University Press.